

이물질에 대한 ECT Bobbin Probe 검출 감도

Detection of Foreign Objects Using Bobbin Probe in Eddy Current Test

정희성*[†], 권영호*, 이동하*, 신욱조*, 임찬기*

Hee-Sung Jung*[†], Young-Ho Kweon*, Dong-Ha Lee* Wook-Jo Shin* and Chan-Ki Yim*

초 록 증기발생기 2차측(관판 상단 및 관 지지판)에 잔류하는 이물질은 전열관에 마모를 야기하여 누설을 발생시킬 가능성이 있으며, 마모는 전열관 재료의 부식 특성과는 별개로 이물질의 재료, 형태, 크기 등에 따라 큰 영향을 받는다. 관판 상단 및 관 지지판 부위의 이물질 여부는 원격육안검사(FOSAR) 방법과 와전류탐상검사(ECT)를 통해 확인하고 있다. 증기발생기 2차측의 잔류 이물질은 그 재질이나 전열관과의 접촉상태 등에 따라 검출하는데 제한성이 나타난다. 따라서, 본 연구에서는 다양한 형태와 재료의 이물질을 관판 상단에서 수직 및 수평한 방향으로 이동시켰을 때, 이물질에 대한 보빈신호의 검출 감도를 측정하기 위해 데이터를 수집하고 분석하였다.

주요용어: 증기발생기, 이물질, 와전류탐상검사, 관판 상단, 감도

Abstract Residual foreign objects at the secondary side (top of the tubesheet and tube support plates) of a steam generator are likely to cause a leak by causing wear in the tube. The extent of wear is significantly affected by the material, shape, and size of the foreign object, and the corrosion properties of the tube. The presence of foreign objects at the top of the tubesheet and tube support plates has been identified using remote visual inspection methods such as the foreign object search and retrieval and eddy current test (ECT). The detection of the residual foreign object at the secondary side of a steam generator has limitations that depend on the material properties and the condition of contact with the tube. In this study, which is vertical and horizontal from the upper tubesheet, the corresponding bobbin ECT signals were collected and analyzed to measure its ability to detect foreign objects.

Keywords: Steam Generator, Foreign Objects, Eddy Current Test, Top of Tubesheet, Detectability

1. 서 론

원자력발전소 증기발생기 2차측에 금속 종류의 물질이 유입되는 경우 이물질(foreign objects)은 전열관(steam generator tube)과 접촉하여 마모를 일으키거나 충격을 가하여 전열관의 건전성에 영향을 미칠 수 있다. 전열관의 마모는 전열관 재료의 부식 특성과 별개로 이물질의 재료, 형태, 크기 등에 따라 큰 영향을 받는다. 최근 국내·외 원전에서는 운전 중 이물질에 의한 전열관 손상으로 누설이 발생되어 발전을 정지한 경험이 있다. 관

판 상단 및 관 지지판 부위의 이물질 여부는 원격육안검사(FOSAR) 방법과 와전류탐상검사(ECT)를 통해 확인을 하고 있다. 하지만, 증기발생기 2차측의 이물질은 ECT로 검출하는데 그 재질이나 전열관과의 접촉상태 등에 따라 제한성이 있다.

따라서, 본 연구에서는 9개의 자성체와 비자성체 이물질을 가지고, 전열관이 설치된 tubesheet에서 수직(above)으로 0~18 mm 를 3 mm 간격으로 이동시키면서 bobbin 신호를 취득하였고, bobbin 신호를 통해 tubesheet와 이물질이 분리되어 나타나는 위치를 확인 하였으며, 또한, tube로

부터 수평(lift-off)으로 0~3 mm를 1 mm 간격으로 이동시키면서 bobbin 신호를 취득하여 lift-off에 대한 bobbin 신호의 검출감도를 알아보았다.

2. 이론

2.1. 주파수 및 재질에 따른 신호 특성

주파수가 증가할수록 관 내부 표면 부근에 와전류가 집중 분배되고, 반대로 주파수가 낮아지면 자기장의 분포가 커져 와전류가 관 외부로 확산된다[1]. 이는 와전류 침투깊이가 주파수에 영향을 받기 때문이며 다음과 같은 식으로 표현이 된다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

따라서, 낮은 주파수일수록 관의 결함지시는 검출이 어렵지만, 관 외부에 접촉된 이물질의 확인에는 유용하다. 자성체는 투자율(μ)이 비자성체보다 매우 크기 때문에 자속밀도가 증가하여 검사코일에 유도된 전압이 커지며, 임피던스는 리액턴스 방향으로 증가한다[2]. 즉, 공기 중 신호를 기준으로 자성체는 작용점이 위쪽으로 비자성체는 아래쪽으로 이동한다(Fig. 1)[2].

3. 실험방법

3.1. 실험장치

본 연구에서는 신호수집장치로 Zetec사의 MIZ-30A 와전류탐상기와 M/A-610-ULC/MR type의 bobbin probe 2개, ASME Standard tube, Inconel 690 전열관이 설치된 tubesheet mock-up 시험편(Fig. 2)을 사용하고, software는 EddyNet 11i를 가지고 신호 특성을 분석하여 검출 감도를 확인 하였다.

3.2. 이물질 종류 및 사양

Bobbin 신호의 이물질 지시를 획득하기 위해 자성체 재질의 가스켓 조각(#1), 볼트(#2), 너트(#3), 철 조각(#4), 나사못(#5)과 비자성체 재질의 에어컨넥터(#6), 서스밴드 조각(#7), 터미널(#8), AL관 조각(#9). 총 9가지 이물질(Fig. 3)을 사용하였고, 사양은 Table 1과 같다.

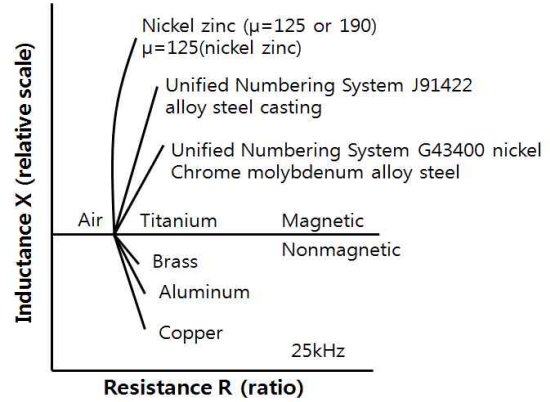


Fig. 1 Permeability loci for different materials[2]

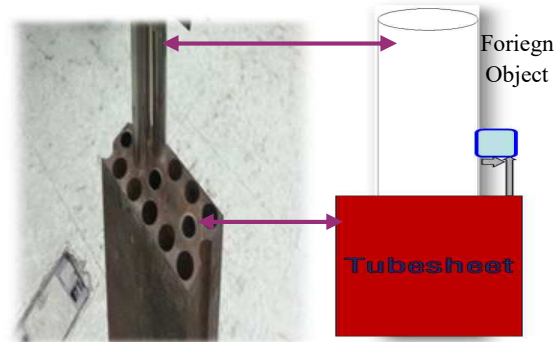


Fig. 2 Mock-up specimen



Fig. 3 Type of foreign objects

Table 1 Type and specifications of foreign objects

Foreign Objects	Materials	Specifications(mm)
Gasket piece(#1)	Magnetic	5*12*0.14
Bolt(#2)		12*12*4
Nut(#3)		5*6*2
Iron piece(#4)		12*22*1
Screw(#5)		D:14, L:28
Air connector(#6)	Non-magnetic	12*14*6
Sus-band piece(#7)		14*20*0.28
Terminal(#8)		8Ø, 1T
AL-tube piece(#9)		13*21*1

3.3. Bobbin 검사 방법

국내 원전 OPR-1000 증기발생기 전열관에 대한 와전류탐상 때 적용하는 절차서와 지침서에 따라 시험주파수를 선정하고, 신호평가를 위한 calibration을 수행하고(Table 2), #1~#9의 이물질들을 mock-up 시험편의 tubesheet로부터 수직(above) 방향으로 0~18 mm를 3 mm 간격으로 이동시키고, tube로부터 수평(lift-off) 방향으로 0~3 mm를 1 mm 간격으로 움직이면서 bobbin data를 취득하여 신호의 특성을 분석하고 감도를 확인하였다.

Table 2 ASME standard calibration

Frequency	550 kHz (Ch1)	300 kHz (Ch3)	150 kHz (Ch5)	20 kHz (Ch7)
Phase	100% TWH 40±2 Deg.			TSP 90±1 Deg.
Voltage	ASME TWH 20% 4 Volts			

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. Bobbin 신호 특성

4.1.1. 이물질 검출 최적 주파수

Fig. 4는 이물질 지시 검출감도를 확인하기 위해 사용된 주파수에 대해 자성체(#1)와 비자성체(#7) 이물질을 tube에 접촉시켜 tubesheet로부터 18 mm 수직한 방향에 위치 시켰을 때, 나타난 bobbin 신호이다. Ch7(20 kHz)의 저주파수에서 자성체 재질(#1~#5)의 이물질이 가장 명확하게 검출이 되었고, 비자성체 재질(#6~#9)의 경우에는 Ch5(150 kHz)의 주파수에서 신호 특성을 더 잘 확인할 수 있었다.

4.1.2. 이물질 위치 변화에 따른 Bobbin 신호

Fig. 5는 tube에 가스켓 조각(#1)을 접촉시킨 상태에서 tubesheet 상단으로 6 mm, 9 mm, 12 mm, 15 mm 이동시켰을 때 Ch7(20 kHz)에서 검출된 bobbin 신호이다. Tubesheet에서 6 mm above된 위치에서의 이물질 신호는 tubesheet의 영향을 크게 받아 검출은 되지만 구별이 곤란하였고, 9 mm above된 위치에서는 신호의 구별이 가능하

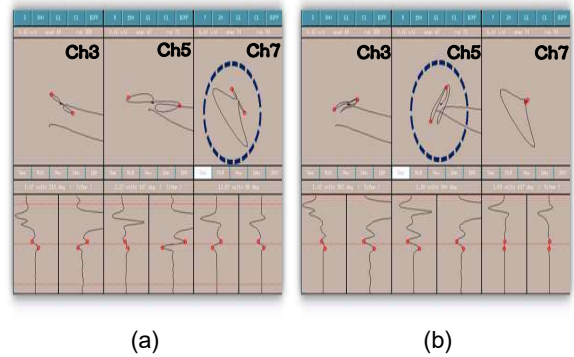


Fig. 4 Optimum frequency of foreign objects detection, (a) magnetic (#1), (b) nonmagnetic (#7)

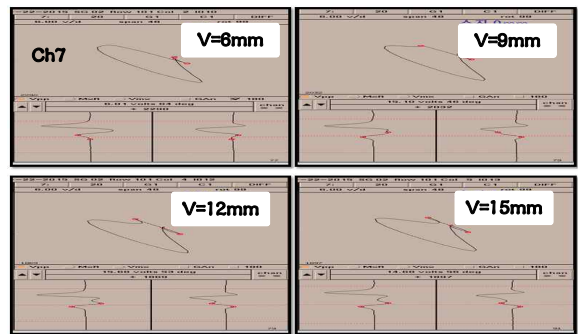


Fig. 5 Bobbin signal to change position of foreign object (#1_ horizontal 0 mm)_Ch7

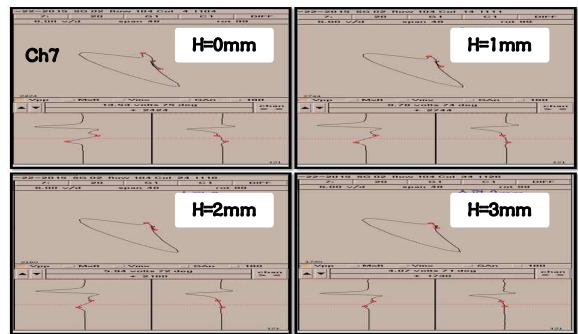


Fig. 6 Bobbin signal to change position of foreign object (#4_ vertical 12 mm)_Ch7

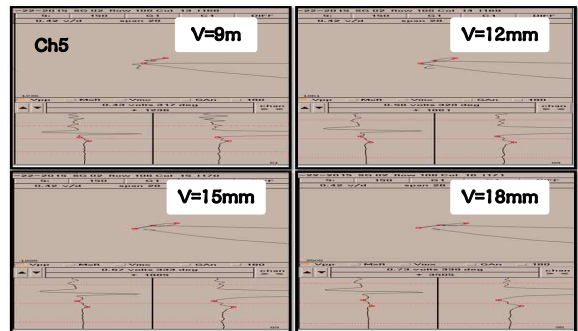


Fig. 7 Bobbin signal to change position of foreign object (#6_ horizontal 1 mm)_Ch5

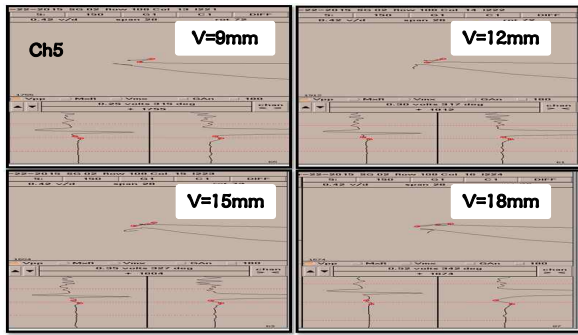


Fig. 8 Bobbin signal to change position of foreign object (#8_ horizontal 1 mm)_Ch5

였으며, 15 mm above된 지점부터는 이물질 신호가 뚜렷하게 검출이 되었다.

12 mm above된 지점에서 이물질 신호가 뚜렷하게 검출된 철판 조각(#4)을 동일위치에서 tube로부터 1 mm 씩 최대 3 mm 까지 lift-off 시키면서 나타난 bobbin 신호가 Fig. 6이다. 그림에서 알 수 있듯이 tube와의 접촉거리가 멀어질수록 신호의 세기가 작아져서 검출 감도가 작아진다. 이는 관 외부로 확산된 와전류로부터 거리가 멀어지면서 영향을 덜 받기 때문이다. Fig. 7과 Fig. 8은 비자성체 재질의 이물질인 에어컨넥터(#6)와 터미널(#8)을 tube로부터 1 mm lift-off 시켰을 때, tubesheet 상단으로 9 mm, 12 mm, 15 mm, 18 mm 이동시 Ch5(150 kHz)에서 검출된 bobbin 신호이다. 자성체 이물질 신호보다는 진폭이 매우 작지만, tubesheet 상단 9 mm에서부터 이물질 지시가 검출이 되었다.

4.1.3. Bobbin 신호 진폭 비교

Fig. 9는 자성체 재질 이물질(#1~#4)의 위치 변화에 따른 bobbin 신호의 진폭을 그래프로 나타내었다. Tube와 접촉된 상태에서 tubesheet 상단 9 mm에서부터 이물질이 분리되어 검출되었고, tube에서 1 mm lift-off된 위치까지는 공통적으로 검출이 가능하였다. 또한 tube로부터 최대 3 mm lift-off된 위치까지 검출 가능한 경우도 있었다. 반면, 나사못(#5)의 이물질 같은 경우에는 tube에 접촉된 면이 매우 작아 오직 tubesheet 상단 18 mm에서만 검출이 되었고 그 신호의 세기는 매우 약했다. Fig. 10은 비자성체 재질 이물질(#6~#9)의 위치 변화에 대한 bobbin 신호의 진폭 그래프로, 에어컨넥터(#6)와 터미널(#8)은 tube에

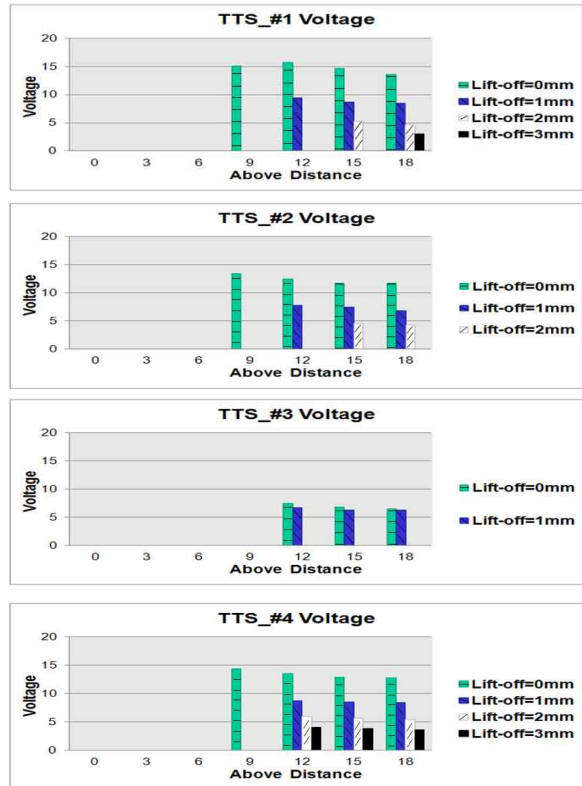


Fig. 9 Bobbin signal amplitude to change position of foreign object (#1 to #4)

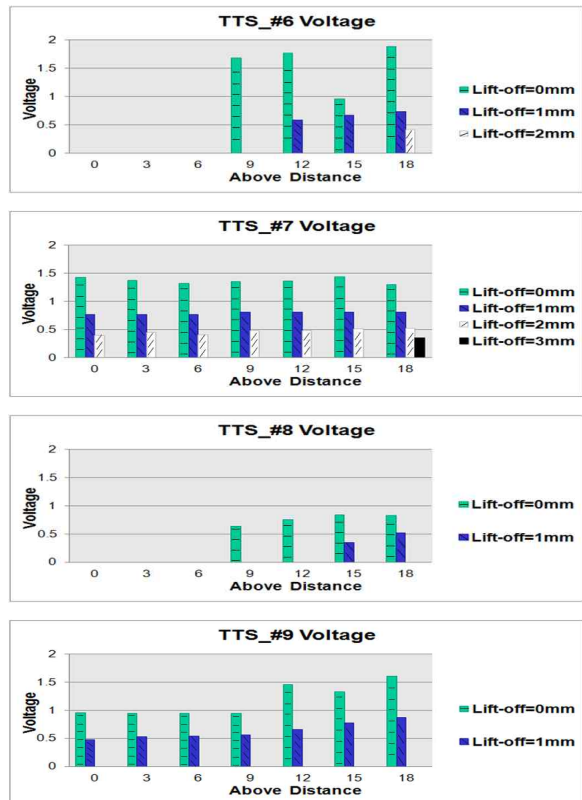


Fig. 10 Bobbin signal amplitude to change position of foreign object (#6 to #9)

접촉된 상태에서 tubesheet로부터 최소 9 mm above된 위치부터 검출이 되었고, tube에서 1 mm lift-off된 경우에도 모두 검출이 되었다. 서스밴드 조각(#7)과 AL판 조각(#9)의 경우 tubesheet에 접촉된 지점에서부터 검출이 가능하였으며, 서스밴드 조각(#7)은 tube로부터 3 mm lift-off된 지점에서부터 검출이 되었다. 이 두 물질은 전도도가 크고 tube에 접촉된 면이 넓으며 tubesheet와 재질이 다르기 때문에 신호의 세기는 작지만 검출이 가능하였다.

5. 결론

이물질 검출 정도는 재질, 접촉정도, 크기, 형태 및 외부환경 등 다양한 변수들에 의해 좌우된다. Tubesheet 상단에서 이물질의 위치 변화에 따른 bobbin 신호의 검출 감도는 다음과 같다.

- 1) 본 논문에서 재질에 따른 이물질 검출 최적 주파수는 자성체는 Ch7(20 kHz), 비자성체는 Ch5(150 kHz)로 이물질 신호가 가장 뚜렷하였다.
- 2) 자성체와 비자성체의 이물질의 경우, 두 재질 모두 tubesheet로부터 최소 9 mm 이상 above된 위치에서 검출이 가능하였으며, 18 mm above된 위치에서 tube로부터 수평(lift-off)으로 최대 3 mm까지 떨어진 곳에서 검출이 가능한 경우도 있었다. 신호가 가장 뚜렷하게 검출된

tubesheet로부터 15 mm above된 위치에서 자성체는 평균 2 mm, 비자성체는 평균 1 mm로 tube로부터 수평(lift-off)으로 떨어졌을 경우 검출이 가능하였다.

- 3) Tubesheet와 이물질의 성질이 비슷하고 크기가 큰 경우, 신호가 상호 분리되어 나타나는 이격거리에 있어야 검출이 가능하였다.
- 4) 서스밴드 조각(#7)과 AL판 조각(#9)의 경우 전도도가 크고 tube에 접촉된 면이 넓으며 tubesheet와 물질의 성질이 다르기 때문에 tubesheet와 접촉된 지점에서부터 검출이 되었다.

References

- [1] Y. Lee, "Eddy Current Testing," Non-Destructive Testing Theory & Application 6, pp. 27-28, NODE MEDIA, (2012)
- [2] S. S. Udpa and P. O. Moore, "Electromagnetic Testing," Nondestructive Testing Handbook, Third Edition, Vol. 5, pp. 323-328, ASNT, (2004)
- [3] H.-S. Jung, Y.-T. Lee, J.-G. Yang and W.-C. Jung, "Analysis of eddy current signals according to the type properties," Proceedings of Spring Conference of Korean Society for Nondestructive Testing, pp. 448-456 (2010)